

SOI 结构 M-Z 型调制器的有限元法分析¹

赵策洲 刘恩科 李国正 高勇 刘西钉

(西安交通大学电子工程系 西安 710049)

摘要 本文提出了采用有限元法分析 SOI(Silicon on Insulator) 结构 M-Z(Mach-Zehnder) 干涉型调制器的新方法。该方法在大截面单模 SOI 脊形波导理论的基础上, 根据等离子体色散效应分析了这种调制器的电光调制机理; 根据有限元法分析了 p^+n 结大注入时该调制器的电学性质, 从而为实际研制成这种干涉型调制器打下了理论基础。

关键词 集成光学, 调制器, 有限元法, SOI

中图分类号 TN256, TN761

1 引言

在集成光学中, Mach-Zehnder(M-Z) 干涉型调制器是基本有源器件之一。近年来, 随着人们对硅基材料的进一步研究和认识, 采用热光效应的 SOI 和 GeSi/Si 结构的 M-Z 干涉型调制器已进行了研究^[1,2]。但基于等离子体色散效应的硅基 M-Z 调制器的模型和研制却没有见诸报道。本文根据有限元法特别适用于复杂几何结构和介电特性分布的思想^[3], 针对等离子体色散效应的 SOI 结构 M-Z 干涉型调制器进行了有限元法分析, 给出了这种调制器的简单物理模型, 为我们正在进行的 SOI M-Z 调制器的研制, 做一些理论准备。

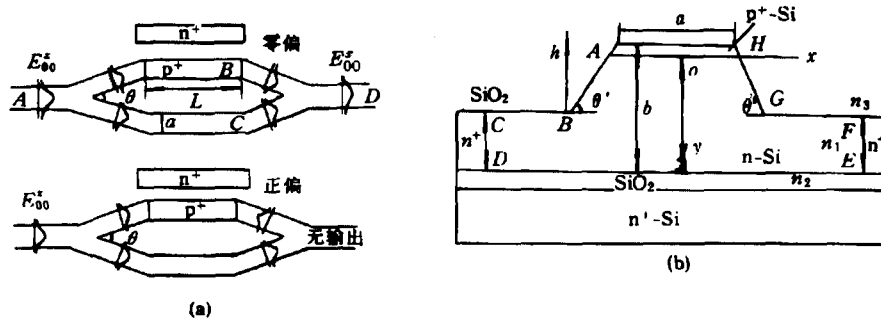


图 1 M-Z 调制器工作原理 (a) 和结构 (b)

2 SOI M-Z 调制器的电光调制机理

对于图 1(a) 所示 SOI 结构 M-Z 调制器, 其调制区截面图如图 1(b) 所示。分支 B 和 C 的结构完全对称。分支 A 的 E_{00}^+ 模通过第一个分支点馈入分支 B 和 C 形成两个 E_{00}^+ 模。这两个模到达第二个分支点, 当调制区有空穴注入时, 可通过增加空穴的注入量使分支 B 中的 E_{00}^+ 模与分支 C 中的 E_{00}^+ 模相位差为 π , 这时分支 D 中无输出, 分支 B 中调制区的长度满足

$$\Delta\beta_{00}L = \pi, \tag{1}$$

¹ 1995-03-09 收到, 1996-01-04 定稿
国家“863”计划基金资助

式中 $\Delta\beta_{00}$ 是分支 B 中导模传播常数的变化, 按一阶微扰理论^[4]

$$\Delta\beta_{mn} = \frac{k_0^2}{\beta_{mn}} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(y)|^2 [n(y)\Delta n(y)] dy}{\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(y)|^2 dy}, \quad (2)$$

式中 $n(y)$ 为波导各层折射率, $\Delta n(y)$ 为空穴注入引起的波导芯折射率变化, k_0 为真空波数, $\psi(y)$ 为波导 y 方向芯场分布, β_{mn} 为传播常数, 它由梯形截面脊形波导的模方程^[5] 确定. 由各向异性腐蚀法, 在 $\langle 100 \rangle$ 晶向上, 梯形下底角 $\theta' = 54.74^\circ$. 为了保证各分支波导只传输基模, 脊高 b 和脊宽 a 必须满足大截面脊形波导的单模条件^[6]. 波导芯折射率的变化 Δn_1 可由等离子体色散效应^[7] 确定:

$$\Delta n_1 = -6.0 \times 10^{-18} N_h^{0.8} \quad (3)$$

式中 $N_h(\text{cm}^{-3})$ 是 p^+n 结注入到波导芯层的平均空穴浓度, 它可由下面分析的有限元法确定.

3 p^+n 结大注入的有限元法分析

对于图 1(b) 所示的二维 p^+n 结结构, 采用了 x 方向对称形式 (即实际上图 1(a) 所示的 Y 型波导区中间应还有 n^+ 层, 只是因为图中画不下而没有示出). 采用有限元法对调制区中的 n -Si 层进行网格划分, 并根据求解系数矩阵为大型稀疏矩阵的线性方程组子程序来求解扩散方程的总刚方程. 所求解的 p^+n 结二维稳态扩散方程为

$$\partial^2 p / \partial x^2 + \partial^2 p / \partial y^2 - (p - p_n) / L_p^2 = 0, \quad (4)$$

式中 p 和 p_n 分别为波导芯空穴浓度和平衡空穴浓度, L_p 为波导芯中空穴的扩散长度. 忽略 p^+ 层的厚度 (通常小于 $0.5\mu\text{m}$), 则该问题的边界条件可进行如下处理: (1) 在 AB, BC, HG, GF 处忽略表面复合, 满足自由边界条件; (2) 在 CD, FE 处空穴浓度为 p_n ; (3) 在 DE 边界, 由于大注入时通常可使 $L_p \gg b$, 因此边界条件为

$$2D_p \partial p / \partial y|_{y=b} = S_p [N_h(0) - p_n], \quad (5)$$

式中 $2D_p$ 为大注入时空穴的扩散系数, $N_h(0)$ 为 $y=0$ 处空穴的浓度, S_p 为界面 (SiO_2/Si 界面) 复合速度, S_p 可由 C-V 特性测得, 不妨取 $S_p=10\text{cm/s}$ ^[8]. 运算中取 p^+ 层掺杂浓度 $N_A = 5.0 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 波导芯掺杂 $N_D = 1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^3$, 则 $p_n = 1.9 \times 10^5/\text{cm}^3$, 大注入时 $L_p \approx 22\mu\text{m}$. 由单模条件, 可取 $b = 6\mu\text{m}, h = 2\mu\text{m}, a = 6\mu\text{m}$. 取 Y 型波导分支角 $\theta = 3.8^\circ$ ^[1], 则可取 $DE = 30\mu\text{m}$. 取 p^+n 结正偏压 $V_A=0.95$ 伏, 由下式:

$$p(x, y) = N_h(0) = n_i \exp[qV_A/(2kT)], \quad y = 0, \quad |x| \leq \frac{a}{2} \quad (6)$$

可确定 $N_h(0) = 1.45 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 式中 k 是玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, n_i 为硅的本征载流子浓度. 根据以上参数以及 (4) 式和 (5) 式编制程序, 模拟的结果如图 2 所示. 由图 2 可求得注入空穴的平均浓度 $N_h = 1.07 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ (在 $|x| \leq a/2, 0 < y < b$ 内取平均), 从而由 (3) 式可得波导芯折射率的变化为 $\Delta n_1 = 1.5909 \times 10^{-3}$. 因此由 (2) 式可求得 E_{00}^z 模传播常数的变化 $\Delta\beta_{00} = 3.847 \times 10^{-3}/\mu\text{m}$, 最后由 (1) 式确定 M-Z 干涉型调制器调制区的长度 $L=816.68\mu\text{m}$. 这个数值计算的例子列在表 1 中. 从而, SOI 结构 M-Z 干涉型调制器 p^+n 结正偏压与调制区中空穴平均浓度的关系如图 3 所示.

表 1 SOI 结构 Mach-Zehnder 干涉型调制器结构参数和 100% 调制时的电学参数 (举例)

参数	a(μm)	b(μm)	h(μm)	L(μm)	N _D (cm ⁻³)	N _A (cm ⁻³)	V _A (V)	θ'	θ
数值	6.0	6.0	2.0	816.7	1. × 10 ¹⁵	5. × 10 ¹⁸	0.95	54.7°	3.8°

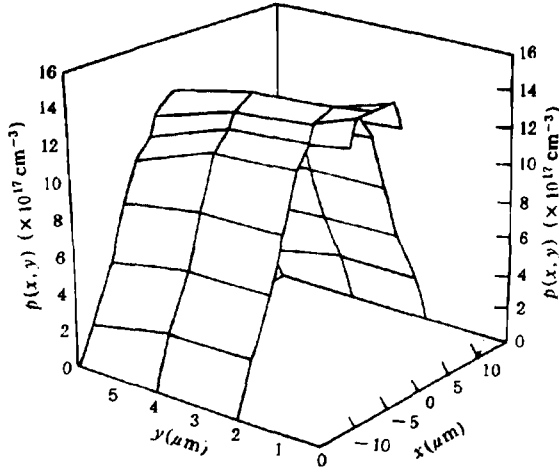


图 2 M-Z 调制器调制区空穴分布

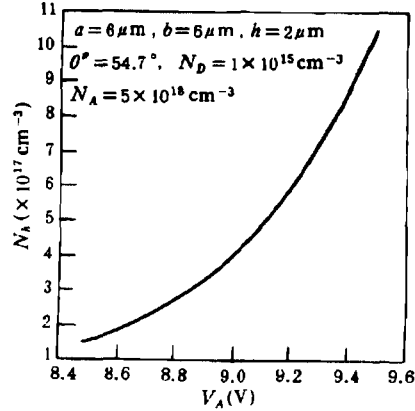


图 3 p⁺n 结正偏压与调制区中空穴平均浓度的关系

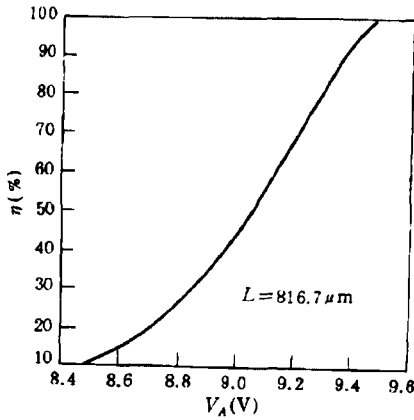


图 4 M-Z 调制器调制深度与 p⁺n 结正偏压的关系

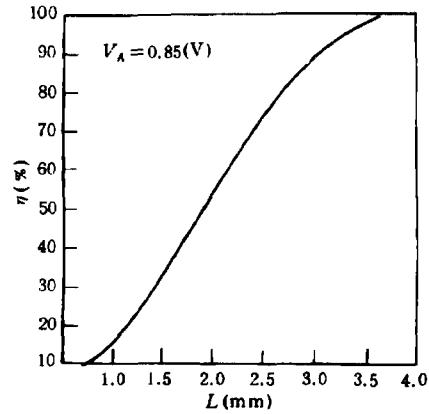


图 5 M-Z 调制器调制深度与调制区长度的关系

4 SOI 结构 M-Z 干涉型调制器性能分析

由于 SOI 结构波导芯 (Si) 与两侧的限制层 (SiO₂) 的折射率相差很大, 其波导的质量比全硅波导的要好, 光波传输损耗很小 [9], 因此 SOI M-Z 调制器的性能将比全硅 M-Z 调制器的要好. 在半导体材料的 M-Z 调制器中, 尽管硅不像 GaAs 和 GaAlAs/GaAs 那样具有线性电光效应, 但根据前面的分析, 等离子体色散效应足以解决电光调制的问题. 下面讨论一下 SOI 结构 M-Z 调制器的调制深度 η 与 p⁺n 结正偏压 V_A 的关系. 在调制区长度一定时, M-Z 调制器的调制深度与输出光强 P_{out} 和输入光强 P_{in} 的关系为

$$\eta = (P_{in} - P_{out})/P_{in} = 1 - \cos^2(\Delta\phi/2) = 1 - \cos^2(L\Delta\beta_{mn}/2), \quad (7)$$

式中 $\Delta\phi$ 和 $\Delta\beta_{mn}$ 为图 1(a) 中分支波导 B 和 C 中 E_{mn}^z 模的相位差和传播常数差. 当调制深度到达 100% 时, V_A 和 L 取表 1 中的值, 这时 $\Delta\beta_{mn} = \Delta\beta_{00} = 3.847/\mu\text{m}$. 因此根据图 3 以及 (2)、(3) 和 (7) 式可得 SOI 结构 M-Z 调制器调制特性曲线, 如图 4 所示. 同理, 在 p^+n 结偏压一定时, 可得 SOI 结构 M-Z 调制器调制深度与调制区长度 L 的关系, 如图 5 所示.

5 结 论

本文根据等离子体色散效应和 p^+n 结大注入效应, 运用数值方法对 SOI 结构的 M-Z 干涉型电光调制器进行了数值模拟, 给出了没有线性电光效应的硅基材料的这种器件的物理模型, 分析了它的结构参数, 电学参数和性能参数之间的关系, 并给出了这种器件的设计实例, 从而为下一步具体研制这种器件打下了理论基础.

参 考 文 献

- [1] Mayer R A, Jung K H, Lee W D, *et al.* Optics Lett., 1992, 17(24): 1812-1814.
- [2] Fischer U, Zinke T, Schuppert B, *et al.* Electron. Lett., 1994, 30(5): 406-408.
- [3] 周乐柱, 电子学报, 1994, 22(3): 77-85.
- [4] Adams M J, Ritchie S, Rbertson M J. Appl. Phys. Lett., 1988, 48(13): 820-822.
- [5] 刘育梁, 刘恩科. 光学学报, 1991, 11(8):727-732.
- [6] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. IEEE J. of QE, 1991, QE-27(8):1971-1973.
- [7] Pirnat T, Friedman L, Soref R A. J. Appl. Phys., 1991, 70(8): 3355-3359.
- [8] Vablonovitch E, Swanson R M, *et al.* Appl. Phys. Lett., 1986, 48(3): 245-247.
- [9] 赵策洲, 刘恩科, 李国正. 光学学报, 1994, 14(7): 783-784.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE SOI STRUCTURE M-Z INTERFEROMETRIC MODULATOR

Zhao Cezhou Liu Enke Li Guozheng Gao Yong Liu Xiding

(*Electronic Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*)

Abstract A new method for analysing SOI (Silicon on Insulator) s structure Mach-Zehnder interferometric modulator by using finite element method is put forward. On the basis of the theory of the single-mode SOI rib optical waveguides with large cross-section, the electro-optic modulating mechanism of the modulator is investigated by using the plasma dispersion effect, and the electrical characteristics of the device is analysed by using the finite element method at p^+n junction large injected. So the method provides a basis of the theory for the device to be fabricated.

Key words Integrated optics, Modulator, Finite element method, SOI material

赵策洲: 男, 1964 年生, 博士, 副教授, 现工作单位: 西安电子科技大学微电子所, 现从事微电子器件可靠性和硅基集成光学研究.

刘恩科: 男, 1930 年生, 博士生导师, 教授, 现从事半导体光电器件及其集成技术的研究.

李国正: 男, 1939 年生, 副教授, 现从事半导体光电器件及其集成技术的研究.